

# 不同提取工艺翅果油抗氧化能力与活性成分的分析

张忠<sup>1</sup>, 王呈馨<sup>2</sup>, 范柳萍<sup>2</sup>, 李娟<sup>3</sup>

(1. 山西医科大学人体解剖教研室, 太原 030001; 2. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122;

3. 山西琪尔康翅果生物制品有限公司, 山西临汾 041000)

**摘要:**采用 DPPH 自由基、ABTS 自由基、羟基自由基清除能力法和 PF 还原法测定了不同提取工艺(超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取法, 有机溶剂提取法, 直压冷榨法, 直压热榨法和红外热榨法)制得的翅果油、翅果油中极性和非极性部分的抗氧化能力, 同时对翅果油中的微量活性成分进行了分析, 并对翅果油中微量活性成分含量与其抗氧化能力进行了相关性分析。结果表明, 除羟基自由基清除能力外, 不同翅果油对 DPPH 自由基、ABTS 自由基清除能力和 Fe<sup>3+</sup> 还原能力不同, 5 种提取工艺所得翅果油的极性部分抗氧化活性最强, 全油次之, 非极性部分抗氧化活性最弱。在翅果油的极性部分中, 红外热榨法的 DPPH 自由基清除能力最强, 为 1 080.35 μmolTE/100 g, 直压冷榨的羟基自由基清除能力最强, 为 38 272.82 μmolTE/100 g, 有机溶剂提取的 ABTS 自由基清除能力最强, 为 2 000.76 μmolTE/100 g, 红外热榨的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力最强, 为 2 771.89 μmolTE/100 g。翅果油中微量生物活性成分与抗氧化活性相关性分析表明, 翅果油中的生物活性成分含量与 4 种抗氧化活性指标均呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),  $\gamma$ -生育酚、 $\delta$ -生育酚和羽扇豆醇是翅果油中重要的抗氧化基础物质。

**关键词:**翅果油; 极性部分; 非极性部分; DPPH 自由基清除能力; ABTS 自由基清除能力; 羟基自由基清除能力; PF 还原法; 活性成分

中图分类号: TS221; TQ641

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2020)09-0023-07

## Antioxidant ability and active components of *Elaeagnus mollis* Diels seed oil extracted by different processes

ZHANG Zhong<sup>1</sup>, WANG Chengxin<sup>2</sup>, FAN Liuping<sup>2</sup>, LI Juan<sup>3</sup>

(1. Department of Anatomy, Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, China; 2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 3. Shanxi Qierkang Samara Biological Co., Ltd., Linfen 041000, Shanxi, China)

**Abstract:** The antioxidant capacity of *Elaeagnus mollis* Diels seed oil extracted by five different processes (supercritical CO<sub>2</sub> fluid extraction method, solvent extraction method, cold pressing method, hot pressing method and infrared hot pressing method) was evaluated by DPPH, ABTS and hydroxyl radical scavenging capacity, and PF reducing power, as well as the antioxidant capacity of the polar and non-polar fractions of the oil. In addition, the trace active components in *Elaeagnus mollis* Diels seed oil were analyzed, and the correlation analysis of the trace active components content and its antioxidant capacity was carried out. The results showed that except for the hydroxyl radical scavenging capacity, the antioxidant capacities on DPPH and ABTS and PF reducing power varied from the different oils, and the polar fractions of oils obtained by the five processes had the strongest antioxidant capacity, followed by

the whole oil, and the non-polar fraction was the weakest. In the polar fraction of *Elaeagnus mollis* Diels seed oil, infrared hot pressing method had the highest DPPH scavenging capacity (1 080.35 μmolTE/100 g), cold pressing method had the

收稿日期: 2019-12-07; 修回日期: 2020-04-27

作者简介: 张忠(1981), 男, 在读硕士, 研究方向为功能性食品 (E-mail) 451129143@qq.com。

通信作者: 范柳萍, 教授 (E-mail) fanliuping@jiangnan.edu.cn。

highest hydroxyl radical scavenging capacity (38 272.82  $\mu\text{molTE}/100\text{ g}$ ), while solvent extraction had the highest ABTS free radical scavenging capacity (2 000.76  $\mu\text{molTE}/100\text{ g}$ ), and infrared hot pressing method had the highest  $\text{Fe}^{3+}$  reducing power (2 771.89  $\mu\text{molTE}/100\text{ g}$ ). The correlation analysis showed that the bioactive components in *Elaeagnus mollis* Diels seed oil were significantly and positively correlated with the four kinds of antioxidant activity indexes ( $p < 0.01$ ). The essential antioxidant substances in *Elaeagnus mollis* Diels seed oil were  $\gamma$ -tocopherol,  $\delta$ -tocopherol and lupeol.

**Key words:** *Elaeagnus mollis* Diels seeds oil; polar fraction; non-polar fraction; DPPH· scavenging capacity; ABTS free radical scavenging capacity; hydroxyl radical scavenging capacity; PF reducing power; active component

翅果油树 (*Elaeagnus mollis* Diels) 是一种落叶乔木, 属胡颓子科、胡颓子属, 属于国家二级濒危保护植物<sup>[1]</sup>。翅果油树主要分布在山西省的翼城、平陆和乡宁等地, 在陕西省也有零星分布<sup>[2]</sup>。翅果油中不饱和脂肪酸、 $V_E$ 、植物甾醇等营养成分含量丰富, 具有抗氧化、降血脂等多种生理功能。陈雨娜<sup>[3]</sup>以昆明种小鼠为研究模型, 发现翅果油可显著提高小鼠血清及肝脏组织的抗氧化能力和血脂调节能力。黄玲等<sup>[4]</sup>发现翅果油在 Wistar 雄性大鼠体内的抗氧化作用显著强于同等剂量的纯  $V_E$ , 也强于沙棘油。翅果油的抗氧化功能与其脂肪酸组成、有益伴随物密切相关。国外有较多对不同植物油中有益微量伴随物含量与抗氧化能力关系的报道。Antónia 等<sup>[5]</sup>分析了橄榄果渣中  $V_E$ 、脂肪酸组成以及总酚含量, 并对其抗氧化能力进行初步研究, 结果表明羟基酪醇、 $\alpha$ -生育酚和多不饱和脂肪酸都是橄榄果渣中重要的抗氧化基础物质。Behvar 等<sup>[6]</sup>采用 GC-MS 检测了薄荷精油中的各种有益伴随物含量, 并采用 6 种不同的方法检测其抗氧化能力, 结果表明薄荷精油具有强的自由基清除能力、金属离子螯合能力和铁离子还原力, 可作为高效的抗氧化剂。

目前, 翅果油的研究主要集中在翅果油的营养成分、制备工艺以及降血脂、抗炎、抗疲劳等功能方面, 缺乏翅果油不同制油方法、不同细分部分的抗氧化活性以及抗氧化活性的基础物质的研究, 为此本文深入分析了 5 种不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分的抗氧化能力, 并通过相关性分析初步研究了翅果油抗氧化能力与翅果油中生物活性成分含量之间的关系, 明确其抗氧化活性的主要基础物质, 以期为功能性翅果油的高质量开发提供详实的数据和理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

翅果油树种子, 由山西琪尔康翅果生物制品有

限公司提供。无水乙醇、氢氧化钾等, 均为分析纯。角鲨烯标准品、 $V_E$  标准品、甾醇标准品、维生素 E 水溶性类似物 (Trolox), 均购于 Sigma 公司。

N-20 多功能氮吹仪, CP214 电子分析天平, CS-700Y 型摇摆粉碎机, SC-30 超级恒温槽, CZR091 型榨油机, SFE 500 超临界萃取设备, HPLC 2414 液相色谱分析仪, GC-9A 气相色谱分析仪。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 翅果油的不同提取工艺

按以下 5 种工艺提取翅果油, 之后将翅果油置于 4℃ 冰箱中保存, 用于生物活性成分和抗氧化活性的检测。

##### 1.2.1.1 超临界 $\text{CO}_2$ 流体萃取法

将翅果油树种子粉碎至 80 目, 根据前期试验<sup>[7]</sup>, 称取 120 g 翅果油树种子粉置于萃取釜中, 在萃取压力 30 MPa、萃取温度 50℃、萃取时间 150 min 的条件下进行超临界  $\text{CO}_2$  流体萃取, 获得翅果油。

##### 1.2.1.2 有机溶剂提取法

将翅果油树种子粉碎至 40 目, 取翅果油树种子粉, 参照前期试验<sup>[7]</sup>和 GB 5009.6—2016 中的索氏提取法提取翅果油。以无水乙醚为提取溶剂, 提取条件为料液比 1:10、提取温度 65℃、回流时间 4 h, 蒸干溶剂后得到翅果油。

##### 1.2.1.3 直压冷榨法

根据前期试验<sup>[7]</sup>, 称取适量的翅果油树种子, 装入滤袋置于榨油机中, 在 60 MPa 下压榨, 收集得到翅果油。

##### 1.2.1.4 直压热榨法

参考谭传波等<sup>[8]</sup>提取山茶油的热榨工艺, 适当调整后用于提取翅果油。称取适量的翅果油树种子于托盘中, 在 130℃ 鼓风式烘箱中烘烤 30 min, 趁热装入滤袋置于榨油机中, 在 60 MPa 下压榨, 收集得到翅果油。

### 1.2.1.5 红外热榨法

根据前期试验<sup>[7]</sup>,称取适量的翅果油树种子于托盘中,在150℃远红外烘箱中烘干1h,趁热装入滤袋置于榨油机中,在60MPa下压榨,收集得到翅果油。

### 1.2.2 抗氧化活性的测定

参考刘国艳<sup>[9]</sup>的方法处理翅果油,分别制备翅果油的极性部分和非极性部分。

DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率、Fe<sup>3+</sup>还原能力(吸光度)的测定及计算参照徐鑫等<sup>[10]</sup>的方法。

羟基自由基清除率的测定及计算参照张志英<sup>[11]</sup>的方法。

### 1.2.3 翅果油中生物活性成分的测定

#### 1.2.3.1 甾醇含量的测定

以5 $\alpha$ -胆甾烷醇为内标,采用GC-MS测定翅果油中的甾醇含量<sup>[12]</sup>。KOH-乙醇溶液处理油样后用正己烷萃取,定容后进行GC-MS分析。检测条件:DB-5弹性石英毛细管柱(30m×0.25

mm×0.25 $\mu$ m),载气流速1.0mL/min,分流比100:1,进样量1.0 $\mu$ L,离子化模式EI,分子离子碎片扫描范围( $m/z$ )50~650。

#### 1.2.3.2 V<sub>E</sub>含量的测定

用色谱纯正己烷超声溶解翅果油后,采用高效液相色谱分析测定V<sub>E</sub>含量。色谱条件:Luna Silica色谱柱(150mm×4.6mm×3 $\mu$ m),流动相为正己烷-异丙醇(体积比99:1),检测波长290nm。

#### 1.2.3.3 角鲨烯含量的测定

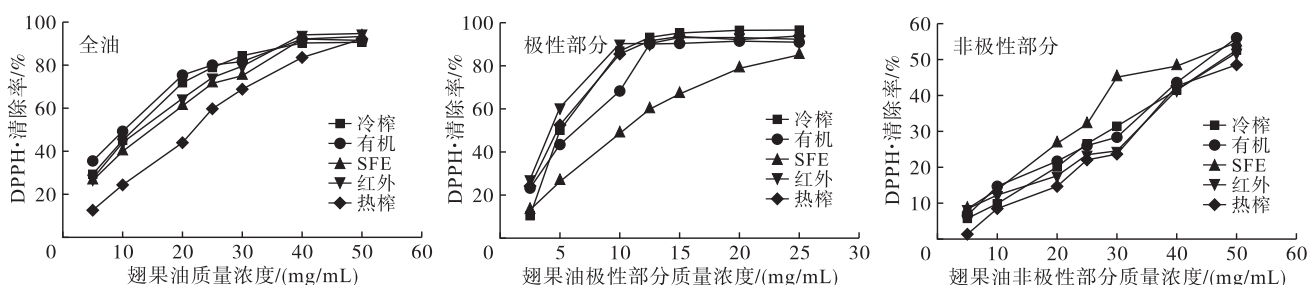
参照张东生等<sup>[13]</sup>的方法测定翅果油的角鲨烯含量。KOH-乙醇溶液处理油样后用正己烷萃取,定容后进行GC分析。色谱条件:Rtx-1弹性石英毛细管柱(30m×0.25mm×0.25 $\mu$ m),FID检测器温度300℃,进样口温度250℃,分流比100:1。

## 2 结果与分析

### 2.1 翅果油的抗氧化能力

#### 2.1.1 翅果油 DPPH 自由基清除能力的比较

不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分对DPPH自由基的清除率如图1所示。



注:冷榨、有机、SFE、红外和热榨分别对应直压冷榨法、有机溶剂提取法、超临界CO<sub>2</sub>流体萃取法、红外热榨法和直压热榨法。下同。

图1 不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分对DPPH自由基的清除率

由图1可见,随着样品质量浓度的增加,DPPH自由基清除率也逐渐增加。在全油中,除直压热榨法外,其余4种提取工艺制得的翅果油质量浓度为40mg/mL时,DPPH自由基清除率已达90%。在翅果油极性部分中,除超临界CO<sub>2</sub>流体萃取法外,其余4种提取工艺在质量浓度为12mg/mL时,DPPH自由基清除率已达90%。在翅果油非极性部分中,5种提取工艺在质量浓度为50mg/mL时,DPPH自由基清除率达到49%以上,且具有良好的线性关系。

根据DPPH自由基清除率的变化趋势,比较5种提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分在同一质量浓度(20.0mg/mL)下DPPH自由基的清除能力,结果如图2所示。

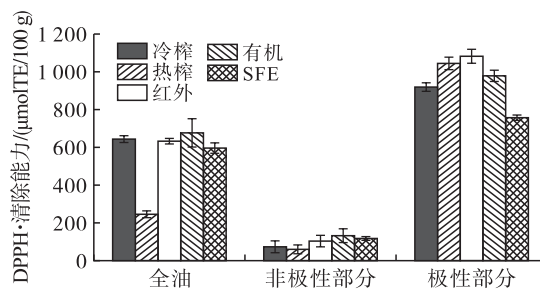


图2 不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分对DPPH自由基的清除能力

由图2可见:在全油中,有机溶剂提取法制得的翅果油DPPH自由基清除能力最强,为678.95 $\mu$ molTE/100g;直压热榨法制得的翅果油DPPH自由基清除能力最弱,为245.22 $\mu$ molTE/100g。在翅果油极性部分中,红外热榨法的DPPH自由基清除能

力最强,为  $1\ 080.35\ \mu\text{molTE}/100\ \text{g}$ ;超临界  $\text{CO}_2$  流体萃取法的 DPPH 自由基清除能力最弱,为  $756.16\ \mu\text{molTE}/100\ \text{g}$ 。在翅果油非极性部分中,有机溶剂提取法的 DPPH 自由基清除能力最强,为  $130.81\ \mu\text{molTE}/100\ \text{g}$ ;直压热榨法的 DPPH 自由基清除能

力最弱,为  $56.05\ \mu\text{molTE}/100\ \text{g}$ 。

### 2.1.2 翅果油羟基自由基清除能力的比较

不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分对羟基自由基的清除率如图 3 所示。

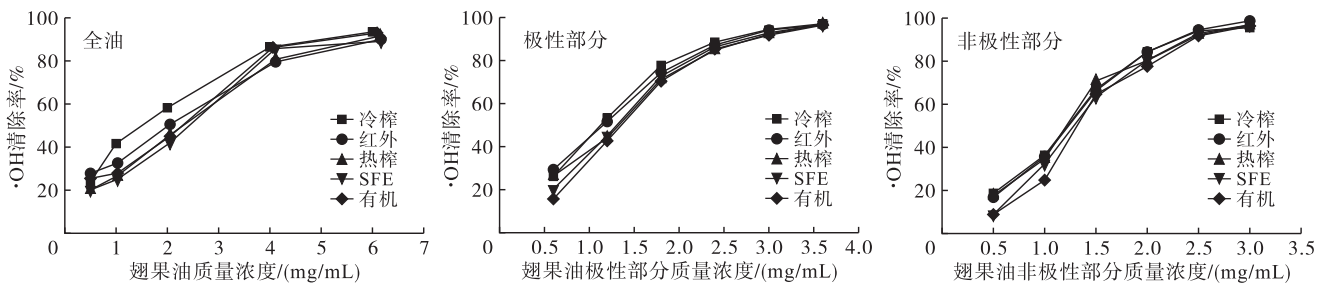


图 3 不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分对羟基自由基的清除率

由图 3 可见,翅果油全油及其极性、非极性部分的羟基自由基清除率均随着样品质量浓度的增加逐渐升高。在同一质量浓度下,5 种提取工艺制得的翅果油全油及其极性和非极性部分的羟基自由基清除率相近。在全油中,当翅果油质量浓度为  $1\sim 4\ \text{mg/mL}$  时,除直压冷榨法外,其他 4 种提取工艺下样品质量浓度与羟基自由基清除率具有良好的线性关系。5 种提取工艺制得的翅果油极性部分在  $3.5\ \text{mg/mL}$  时,羟基自由基清除率均达 90%。5 种提取工艺制得的翅果油非极性部分在  $3.0\ \text{mg/mL}$  时,羟基自由基清除率均达 90%。

自由基的清除能力最弱,为  $11\ 723.36\ \mu\text{molTE}/100\ \text{g}$ 。在翅果油极性、非极性部分中,直压冷榨法对羟基自由基的清除能力最强,分别为  $38\ 272.82$ 、 $32\ 220.76\ \mu\text{molTE}/100\ \text{g}$ 。

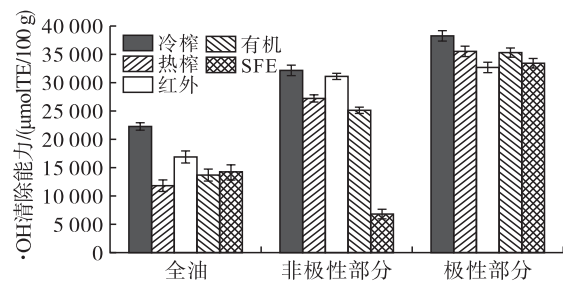


图 4 不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分对羟基自由基的清除能力

在同一质量浓度 ( $2.0\ \text{mg/mL}$ ) 下比较不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分的羟基自由基清除能力,结果如图 4 所示。由图 4 可见:在全油中,直压冷榨法对羟基自由基的清除能力最强,为  $22\ 194.14\ \mu\text{molTE}/100\ \text{g}$ ;直压热榨法对羟基

### 2.1.3 翅果油 ABTS 自由基清除能力的比较

不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分对 ABTS 自由基的清除率如图 5 所示。

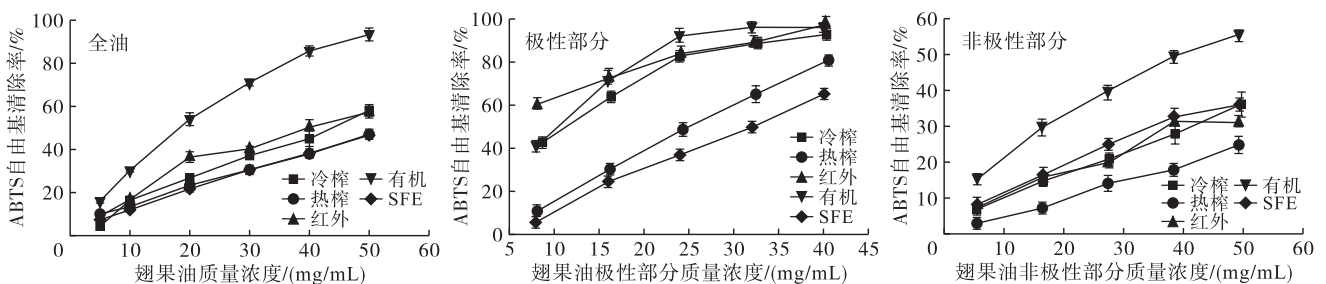


图 5 不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分对 ABTS 自由基的清除率

由图 5 可见,不同提取工艺得到的翅果油对 ABTS 自由基的清除率均随着翅果油质量浓度的增大逐渐增加。在全油中,有机溶剂提取法制得的翅果油在质量浓度为  $50\ \text{mg/mL}$  时,对 ABTS 自由基清除效果最好,清除率可达 90% 以上。在翅果油极性部分中,当质量浓度为  $32\ \text{mg/mL}$  时,除超临界  $\text{CO}_2$  流体萃取法和直压热榨法外,其余 3 种提取工艺制得的翅果油的极性部分对 ABTS 自

由基清除率均达 90% 以上。在翅果油非极性部分中,在  $10\sim 50\ \text{mg/mL}$  的质量浓度范围内,有机溶剂提取法的 ABTS 自由基清除率最高, $50\ \text{mg/mL}$  时为 55%,远高于直压热榨法的。

在同一质量浓度 ( $2.0\ \text{mg/mL}$ ) 下比较不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分的 ABTS 自由基清除能力,结果如图 6 所示。

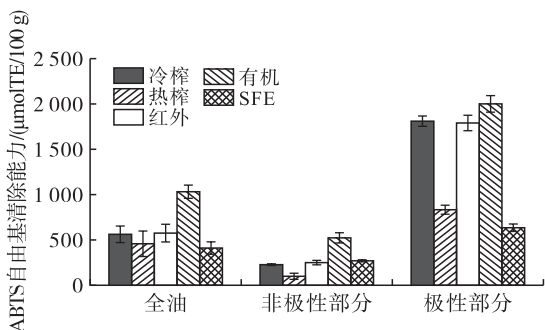


图6 不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分对 ABTS 自由基的清除能力

由图6可见:在全油中,有机溶剂提取法的翅果油对 ABTS 自由基的清除能力最强,为 1 032.02

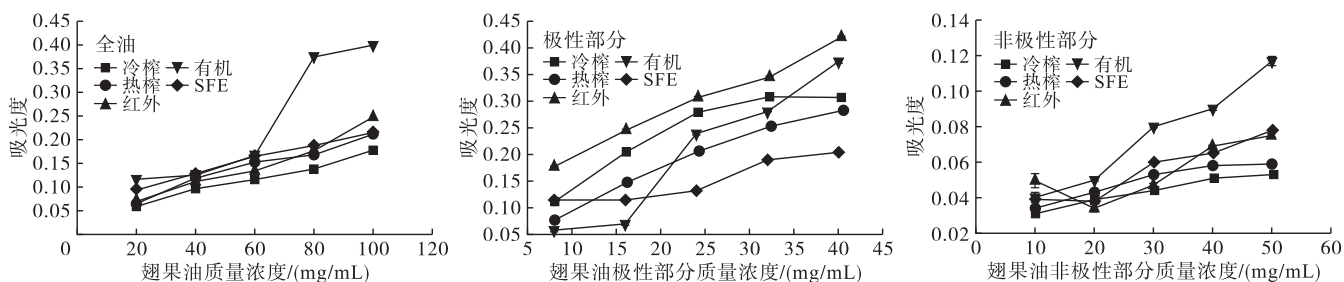


图7 不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力(吸光度)

由图7可见,在全油中,当5种提取工艺制得的翅果油质量浓度在 60~100 mg/mL 范围内时,有机溶剂提取法制得的翅果油 Fe<sup>3+</sup> 还原能力最强。在翅果油极性部分中,当质量浓度在 8~40 mg/mL 范围内时,红外热榨法制得的翅果油 Fe<sup>3+</sup> 还原能力最强。在翅果油非极性部分中,当质量浓度在 20~50 mg/mL 范围内,有机溶剂提取法制得的翅果油 Fe<sup>3+</sup> 还原能力最强。

在同一质量浓度(20.0 mg/mL)下,比较不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力,结果如图8所示。

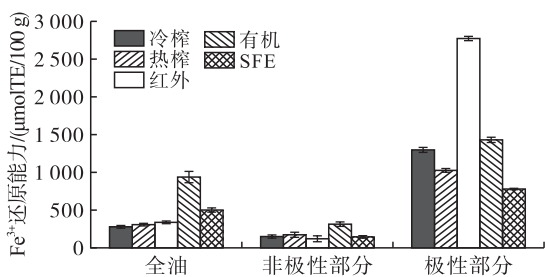


图8 不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力

由图8可见:在全油中,有机溶剂提取法制得的翅果油 Fe<sup>3+</sup> 还原能力最强,达 937.66 μmolTE/100 g,直压冷榨法制得的翅果油 Fe<sup>3+</sup> 还原能力最弱,为 281.57 μmolTE/100 g;在翅果油非极性部分中,有机溶剂提取法的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力最强,为 313.06

μmolTE/100 g,超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取法的对 ABTS 自由基的清除能力最弱,为 459.47 μmolTE/100 g;在翅果油非极性部分中,有机溶剂提取法的对 ABTS 自由基的清除能力最强,为 525.37 μmolTE/100 g,直压热榨法的对 ABTS 自由基的清除能力最弱,为 96.94 μmolTE/100 g;在翅果油极性部分中,有机溶剂提取法的对 ABTS 自由基的清除能力最强,为 2 000.76 μmolTE/100 g,超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取法的对 ABTS 自由基的清除能力最弱,为 636.50 μmolTE/100 g。

#### 2.1.4 翅果油 Fe<sup>3+</sup> 还原能力的比较

不同提取工艺制得的翅果油全油及其极性、非极性部分的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力(吸光度)如图7所示。

μmolTE/100 g,红外热榨法的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力最弱,为 119.35 μmolTE/100 g;在翅果油极性部分中,红外热榨法的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力最强,为 2 771.89 μmolTE/100 g,超临界流体 CO<sub>2</sub> 萃取法的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力最弱,为 780.47 μmolTE/100 g。在同一质量浓度下(20.0 mg/mL),直压冷榨法和超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取法制得的翅果油非极性部分的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力相近,但直压冷榨法制得翅果油极性部分的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力强于超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取法制得翅果油极性部分。而全油部分中,超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取法的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力远高于直压冷榨法,说明与直压冷榨法相比,超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取法更有利于提高翅果油中非极性部分的抗氧化能力。

#### 2.2 不同提取工艺制得的翅果油中生物活性成分的比较(见表1)

由表1可见:有机溶剂提取法的翅果油中 V<sub>E</sub> 含量最高,达到 110.73 mg/100 g,超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取法的次之;有机溶剂提取法和超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取法的翅果油中总甾醇含量显著高于直压冷榨法、直压热榨法和红外热榨法( $p < 0.05$ ),直压热榨法结果与 Dabrowski 等<sup>[14]</sup>的研究结论相同。这可能是由于热榨前处理温度过高引起翅果油中甾醇发生降解,对翅果油中总甾醇含量有较大影响<sup>[15]</sup>。翅果油中甾醇主要有自由态甾醇以及与脂肪酸、酚酸形



成的甾醇酯两种存在形式。直压热榨法和红外热榨法翅果油中总甾醇含量显著高于直压冷榨法 ( $p < 0.05$ ), 这可能是因为直压热榨法和红外热榨法在前处理时, 部分甾醇酯发生分解, 使得甾醇含量增加。不同提取工艺制得的翅果油中角鲨烯含量按由高到低的顺序为直压热榨法、超临界  $\text{CO}_2$  流体

萃取法、有机溶剂提取法、红外热榨法和直压冷榨法。在直压冷榨法、直压热榨法和红外热榨法中, 直压热榨法制得的翅果油中的角鲨烯含量显著高于其他两种压榨提取工艺 ( $p < 0.05$ ), 说明对翅果油树种子进行适当的热处理, 更有利于翅果油中角鲨烯的提取。

表 1 不同提取工艺制得的翅果油中主要生物活性成分含量

活性成分	mg/100 g				
	有机溶剂	直压冷榨	直压热榨	红外热榨	SFE
$V_E$ 总量	110.73 ± 2.17a	86.12 ± 1.52c	82.17 ± 3.24d	80.91 ± 2.04e	96.24 ± 2.80b
$\alpha$ -生育酚	25.05 ± 0.83a	15.18 ± 0.93c	14.82 ± 0.23d	14.07 ± 0.32e	18.23 ± 0.78b
$\alpha$ -生育三烯酚	5.65 ± 0.73a	4.91 ± 0.82a	4.81 ± 0.39a	4.16 ± 0.74a	5.45 ± 0.82a
$\beta$ -生育酚	6.50 ± 0.77a	0	0	0	2.76 ± 0.22b
$\gamma$ -生育酚	49.15 ± 2.32a	50.37 ± 1.78a	47.30 ± 1.21a	47.27 ± 1.23a	47.61 ± 1.27a
$\gamma$ -生育三烯酚	4.34 ± 0.64a	3.80 ± 0.52a	3.56 ± 0.54a	3.51 ± 0.43a	3.74 ± 0.51a
$\delta$ -生育酚	20.04 ± 1.01a	7.27 ± 1.00b	6.99 ± 0.74b	6.79 ± 0.48b	18.45 ± 1.01a
$\delta$ -生育三烯酚	0	4.59 ± 1.34a	4.69 ± 0.32a	5.11 ± 0.76a	0
角鲨烯	46.32 ± 3.56c	32.20 ± 2.93e	56.85 ± 1.72a	41.47 ± 1.53d	52.88 ± 1.32b
总甾醇	362.98 ± 3.46a	224.13 ± 6.74d	272.16 ± 9.69c	280.27 ± 4.33c	325.54 ± 5.87b
$\beta$ -谷甾醇	237.25 ± 6.92a	148.64 ± 4.32c	153.99 ± 4.01c	158.59 ± 3.95c	201.49 ± 3.32b
豆甾醇	44.91 ± 3.94a	28.62 ± 2.32b	43.53 ± 2.12a	37.95 ± 1.78a	40.84 ± 3.54a
$\beta$ -香树素	25.13 ± 1.64a	13.75 ± 1.18b	20.64 ± 1.46a	23.78 ± 1.92a	30.85 ± 4.23a
羽扇豆醇	55.69 ± 4.34a	33.12 ± 2.01b	54.00 ± 3.67a	59.95 ± 4.89a	52.36 ± 3.87a

注: 同行不同字母代表差异显著 ( $p < 0.05$ )。

### 2.3 翅果油中生物活性成分和抗氧化能力的相关性

对不同提取工艺制得的翅果油中的微量生物活性成分如角鲨烯、总甾醇、豆甾醇、 $\beta$ -谷甾醇、羽扇豆醇、 $\beta$ -香树素、 $V_E$  总量、 $\alpha$ -生育酚 ( $\alpha$ -TP)、 $\gamma$ -生育酚 ( $\gamma$ -TP)、 $\delta$ -生育酚 ( $\delta$ -TP)、 $\alpha$ -生育三烯酚 ( $\alpha$ - $T_3$ )、 $\gamma$ -生育三烯酚 ( $\gamma$ - $T_3$ ) 和  $\delta$ -生育三烯酚 ( $\delta$ - $T_3$ ) 与翅果油的抗氧化能力 (DPPH 自由基、羟基自由基、ABTS 自由基清除能力和  $\text{Fe}^{3+}$  还原能力) 进行相关性分析, 研究不同提取工艺制得的翅果油中的微量生物活性成分对翅果油抗氧化能力的贡献, 结果如表 2 所示。

由表 2 可见, 不同提取工艺制得的翅果油中各微量生物活性成分与不同抗氧化能力评价指标之间的相关性各有不同。翅果油抗氧化能力与翅果油中甾醇、生育酚、生育三烯酚总量和单体, 以及角鲨烯均存在极显著的正相关性 ( $p < 0.01$ )。

在本试验中, DPPH 自由基清除能力与翅果油中微量生物活性成分含量的相关系数为 0.811 ~ 0.916, 可以推测相关系数最高的  $\delta$ -生育酚和  $\gamma$ -生育酚是翅果油中重要的抗氧化基础物质。羟基自由基清除能力与翅果油中微量生物活性成分含量的相关系数为 0.845 ~ 0.940, 可以推测相关系数最高的  $\gamma$ -生育酚可能为翅果油中重要的抗氧化基础物质。ABTS 自由基清除能力与翅果油中微量活性成

分含量的相关系数为 0.634 ~ 0.917,  $\text{Fe}^{3+}$  还原能力与翅果油中微量活性成分含量的相关系数为 0.554 ~ 0.853, 可以推测相关系数最高的羽扇豆醇是翅果油中重要的抗氧化基础物质。因此, 推测翅果油中  $\delta$ -生育酚、 $\gamma$ -生育酚和羽扇豆醇是重要的抗氧化基础物质。

表 2 不同提取工艺制得翅果油微量生物活性成分与抗氧化能力相关性分析

活性成分	自由基清除能力			$\text{Fe}^{3+}$ 还原能力
	DPPH 自由基	羟基 自由基	ABTS 自由基	
角鲨烯	0.811**	0.856**	0.696**	0.670**
总甾醇	0.880**	0.888**	0.870**	0.831**
豆甾醇	0.872**	0.893**	0.727**	0.675**
$\beta$ -谷甾醇	0.851**	0.860**	0.815**	0.784**
羽扇豆醇	0.899**	0.907**	0.917**	0.853**
$\beta$ -香树素	0.855**	0.871**	0.854**	0.827**
$V_E$ 总量	0.916**	0.937**	0.795**	0.710**
$\alpha$ -TP	0.915**	0.932**	0.804**	0.727**
$\gamma$ -TP	0.916**	0.940**	0.839**	0.694**
$\delta$ -TP	0.916**	0.920**	0.839**	0.763**
$\alpha$ - $T_3$	0.914**	0.932**	0.803**	0.726**
$\gamma$ - $T_3$	0.826**	0.845**	0.634**	0.554**
$\delta$ - $T_3$	0.828**	0.857**	0.852**	0.716**

注: \* 表示在  $p < 0.05$  水平上显著, \*\* 表示在  $p < 0.01$  水平上显著。

### 3 结论

对翅果油抗氧化能力评价的4种方法中:在DPPH自由基清除能力评价中,5种提取工艺制得的翅果油全油及其极性和非极性部分的抗氧化能力各不相同;在羟基自由基清除能力评价中,5种提取工艺制得的翅果油全油及其极性和非极性部分的抗氧化能力相近;在ABTS自由基清除能力评价中,有机溶剂提取法的翅果油全油及其极性和非极性部分的抗氧化能力最强,超临界CO<sub>2</sub>流体萃取法的翅果油全油和极性部分抗氧化能力最弱,直压热榨法的非极性部分抗氧化能力最弱;在Fe<sup>3+</sup>还原能力评价中,有机溶剂提取法的翅果油全油和非极性部分的抗氧化能力最强,红外热榨法的极性部分抗氧化能力最强。有机溶剂提取法制得的翅果油中V<sub>E</sub>含量最高,超临界CO<sub>2</sub>流体萃取法的次之;有机溶剂提取法和超临界CO<sub>2</sub>流体萃取法的翅果油中总甾醇含量显著高于直压冷榨法、直压热榨法和红外热榨法( $p < 0.05$ );翅果油中角鲨烯含量按照直压热榨法、超临界CO<sub>2</sub>流体萃取法、有机溶剂提取法、红外热榨法和直压冷榨法的顺序依次降低。相关性分析表明,翅果油中各生物活性成分含量与4种体外抗氧化活性指标均呈极显著正相关( $p < 0.01$ ), $\gamma$ -生育酚、 $\delta$ -生育酚和羽扇豆醇是翅果油中重要的抗氧化基础物质。

#### 参考文献:

- [1] WANG Y, QIN Y, DU Z, et al. Genetic diversity and differentiation of the endangered tree *Elaeagnus mollis* Diels (*Elaeagnus* L.) as revealed by simple sequence repeat (SSR) markers[J]. *Biochem Syst Ecol*, 2012, 40(2): 25-33.
- [2] LIANG S, YANG R, DONG C, et al. Physicochemical properties and fatty acid profiles of *Elaeagnus mollis* Diels nut oils[J]. *J Oleo Sci*, 2015, 64(12): 1267-1272.
- [3] 陈雨娜. 翅果油对小鼠抗氧化能力及脂质代谢的影响[J]. *中国油脂*, 2017, 42(6): 77-80.
- [4] 黄玲, 王宝贵, 刘娅. 翅果油抗氧化作用的研究[J]. *卫生研究*, 2002, 31(3): 172-174.
- [5] ANTÓNIA M N, COSTA A, BESSADA S, et al. Olive pomace as a valuable source of bioactive compounds: a study regarding its lipid- and water-soluble components[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 644: 229-236.
- [6] BEHVAR A, GOKHAN Z, BABAKB M, et al. Amylase, glucosidase, tyrosinase, and cholinesterases inhibitory, antioxidant effects, and GC-MS analysis of wild mint (*Mentha longifolia* var. *calliantha*) essential oil: a natural remedy[J]. *Eur J Integr Med*, 2018, 22: 44-49.
- [7] WANG C X, DUANG Z H, FANG L P, et al. Supercritical CO<sub>2</sub> fluid extraction of *Elaeagnus mollis* Diels seed oil and its antioxidant ability[J]. *Molecules*, 2019, 24: 911 [2019-12-07]. <https://doi.org/10.3390/molecules24050911>.
- [8] 谭传波, 田华, 赖琼玮, 等. 不同工艺山茶油中生物活性物质含量的比较[J]. *中国油脂*, 2018, 43(12): 41-44, 49.
- [9] 刘国艳. 茶叶籽油生理活性成分分析及极性伴随物研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2017.
- [10] 徐鑫, 何佳易, 刘国艳, 等. 黑加仑籽油的抗氧化活性研究[J]. *中国油脂*, 2013, 38(9): 48-51.
- [11] 张志英. 山茶油抗氧化防辐射活性成分及其机理的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [12] BOSO S, GAGO P, SANTIAGO J L, et al. New monovarietal grape seed oils derived from white grape bagasse generated on an industrial scale at a winemaking plant[J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2018, 92: 388-394.
- [13] 张东生, 薛雅琳, 金青哲, 等. 油茶籽油中角鲨烯含量的测定[J]. *中国油脂*, 2013, 38(11): 85-88.
- [14] DABROWSKI G, KONOPKA I, CZAPLICKI S, et al. Composition and oxidative stability of oil from *Salvia hispanica* L. seeds in relation to extraction method: chia oil quality and oxidative stability[J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2017, 119(5): 1600209 [2019-12-07]. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201600209>.
- [15] SUJITH KUMAR M S, MAWLONG I, SINGH D. Phytosterol recovery from oilseeds: recent advances[J]. *J Food Process Eng*, 2017, 40(3): e12466 [2019-12-07]. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12466>.